



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11) **EP 0 712 679 A2**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
22.05.1996 Patentblatt 1996/21

(51) Int. Cl.⁶: **B23H 1/02**, B23H 9/14,
B23H 7/18

(21) Anmeldenummer: **95117148.7**

(22) Anmeldetag: **31.10.1995**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
CH DE FR GB IT LI

(30) Priorität: **17.11.1994 DE 4441055**

(71) Anmelder: **AG für industrielle Elektronik**
AGIE Losone bei Locarno
CH-6616 Losone/Locarno (CH)

(72) Erfinder:

- **Marchesi, Alberto**
CH-6672 Gordevio (CH)
- **Boccardoro, Marco**
CH-6653 Verscio (CH)

(74) Vertreter: **Turi, Michael, Dipl.-Phys. et al**
Samson & Partner
Widenmayerstrasse 5
D-80538 München (DE)

(54) **Verfahren und Vorrichtung zur Steuerung von Funkenerosionsprozessen**

(57) Bei einem Verfahren und einer Vorrichtung zur Steuerung eines Funkenerosionsprozesses zwischen einem Werkstück (7) und einer Elektrode (6), etwa einer Mikrobohrungselektrode, wird der Erosionsprozeß dadurch störungsfreier, daß entlang einer ersten Teststrecke der zu erodierenden Strecke wenigstens ein Prozeßparameter gemessen, aus den Meßwerten wenigstens ein Steuerungswert ermittelt und dieser in einem zeitlich nachfolgenden Erosionsabschnitt der zu erodierenden Strecke verwendet wird. Bevorzugt dient der Steuerungswert zur Steuerung einer geeigneten Vorschubgeschwindigkeit der Elektrode (6). Die Störungsfreiheit wird dadurch weiter erhöht, daß zwischen mechanischen und sonstigen Kurzschlüssen unterschieden und die Elektrodenbewegung bei mechanischen Kurzschlüssen anders als bei sonstigen Kurzschlüssen gesteuert wird.

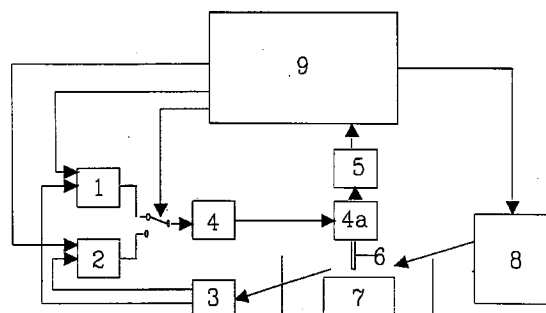


Fig. 1

EP 0 712 679 A2

Beschreibung

Die vorliegende Erfindung befaßt sich mit einem Verfahren und einer Vorrichtung zur Steuerung von Funkenerosionsprozessen, d. h. von Schneid- und Senkerosionsprozessen.

Funkenerosionsprozesse werden zur hochpräzisen Bearbeitung elektrisch leitfähiger Werkstücke durch Elektroden verwendet. Die resultierende Werkstückform wird durch verschiedene Faktoren wie Elektrodenform, Bearbeitungsintensität etc. bestimmt. Für die Bearbeitungsqualität, insbesondere für die Einstellung der gewünschten Präzision, ist neben einer genauen Bahnsteuerung ein möglichst konstantes und stabiles Verhalten der Bearbeitungselektrode maßgeblich; insbesondere kommt es darauf an, den für die jeweils gewünschten Prozeßbedingungen benötigten Abstand zwischen der Elektrode und dem gerade zu bearbeitenden Werkstücksbereich möglichst genau einzuhalten; ebenso die dazugehörige Bearbeitungsdauer und Bearbeitungsintensität. Dies ist vor allem bei sehr dünnen und flexiblen Elektroden problematisch, wie sie im Bereich der Mikroerosion, beispielsweise beim Mikrobohren, verwendet werden. Schwierigkeiten treten hier insbesondere im Umgang mit Störungen wie Kurzschlüssen auf.

Die CH-PS-525 061 (KONDO) offenbart allgemeine Grundlagen der automatisierten Steuerung von Funkenerosionsprozessen. Hierzu zählen insbesondere Detektoreinrichtungen zum Ermitteln von Spannungen und Strömen, eine logische Schaltung, welche die dort gewonnenen Informationen verarbeitet und eine Steuereinrichtung, welche aufgrund dessen den Funkenerosionsprozeß steuert. Die Bewegung der Elektrode erfolgt in Relation zur jeweils aktuellen Spaltleitfähigkeit (d. i. die Leitfähigkeit im Dielektrikum zwischen Elektrode und Werkstück) über einen Servomechanismus. Störungen wie Kurzschlüsse oder Lichtbögen werden unter anderem durch Begrenzen des Kurzschlußstroms bzw. Wegbewegen der Elektrode vom Werkstück behoben.

Die EP-A-0 333 170 (AGIE) bzw. die US-PS-4 864 091 vergleicht eine Soll-Entfernung, welche den aktuell gewünschten Prozessbedingungen für die Bearbeitung des Werkstücks entspricht, mit der Ist-Entfernung zwischen Erosionselektrode und Werkstück. Aus dem Vergleich wird gegebenenfalls ein Fehlersignal gebildet, das über eine Tiefpaßfilterschaltung zu einer Steuerschaltung für die Bewegung der Elektrode geführt wird. Die jeweilige Ist-Entfernung wird vorzugsweise aus der aktuellen Erosionsspannung ermittelt.

Die US-PS-5 159 167 (CHAIKIN et al.) befaßt sich unter anderem mit einer Positionskontrolle für eine Elektrode mittels Funkensensoren und mit einer präzisen Lochgrößen-Regulierung anhand einer "vollständigen" Kontrolle der elektrischen Entladungen.

Die DE 32 04 799 A1 (YAMADA et al.) betrifft eine Einrichtung zur elektrischen Entladungsbearbeitung von Werkstücken, welche sich am "Ende eines Bearbeitungsvorgangs", d. h. in dem Augenblick, in welchem die

Elektrode durch das Werkstück hindurchtritt, automatisch abschaltet.

Aus der DE 33 00 552 C2 (GARBAJS et al.) ist ein Steuerungsverfahren für einen funkenerosiven Bearbeitungsprozeß, bei welchem die im Arbeitsspalt zwischen einem Werkzeug und dem zu bearbeitenden Werkstück auftretenden Entladungsimpulse detektiert und aufgrund ihres jeweiligen charakteristischen Spannungsverlaufs analysiert werden, an sich bekannt. Dabei wird unter anderem zwischen abnormalen Entladungen und Kurzschlußimpulsen aufgrund galvanischer Kurzschlüsse unterschieden, woraufhin die Maschine in unterschiedlicher Weise reagiert.

Diese bekannten Vorrichtungen und/oder Verfahren können häufig nicht angemessen auf plötzliche Veränderungen der Erosionsbedingungen reagieren, etwa auf die plötzlichen Veränderungen im Moment des Durchstoßes einer Mikrobohrelektrode durch die Werkstückunterseite. Ab diesem Moment kann nämlich die Erosionsspülflüssigkeit nach unten ablaufen, oder allgemeiner ausgedrückt durch das Werkstück hindurchlaufen. Dadurch ändern sich der Spüldruck, die Spülgeschwindigkeit und die Bewegungsrichtung der Spülflüssigkeit drastisch. Infolgedessen wird die Lage der Elektrode instabil, es bilden sich Gasblasen im Bohrspalt und die bereits erodierten Teilchen ändern, sofern sie sich noch im Bohrspalt befinden, ebenfalls ihre Bewegungsrichtung und werden wieder nach unten gespült. Dadurch kommt es zu "nicht-mechanischen" bzw. "sonstigen" Kurzschlüssen, abrupten Variationen der Spannung und Verfälschungen der Steuermeßwerte, da die Spaltspannung ihre normale Bedeutung (proportional zur Spaltweite) verliert. Die bekannten Regelsysteme reagieren hierauf mit einem schnellen Rückzug der Elektrode und vergrößern so die Instabilität bzw. sie beenden die Bearbeitung unabhängig davon, ob das tatsächlich erzielte Bearbeitungsergebnis dem gewünschten entspricht oder nicht. Im Ergebnis kommt es insbesondere im ersten Fall zu einer verlängerten Verweildauer der Elektrode im Ausgangsbereich des Bohrlochs. Da die bekannten Verfahren und/oder Vorrichtungen diese Extremsituation nicht als solche berücksichtigen können, werden während der Instabilitätsphase weiterhin Erosionsimpulse freigegeben, die den Lochdurchmesser unregelmäßig und in unerwünschter und nicht steuerbarer Weise vergrößern.

Hiervon ausgehend zielt die Erfindung auf einen störungsfreieren Funkenerosionsprozess ab. Sie erreicht dieses Ziel durch die Gegenstände der Ansprüche 1 bzw. 15.

Anspruch 1 sieht ein Verfahren zur Steuerung wenigstens eines Funkenerosionsprozesses zwischen wenigstens einem Werkstück und wenigstens einer Elektrode, insbesondere einer Mikrobohrungselektrode vor, bei welchem wenigstens in einem Abschnitt einer zu erodierenden Strecke Meßwerte wenigstens eines Prozeßparameters erfaßt werden. Aus den Meßwerten wenigstens eines Prozeßparameters werden (analog oder nachträglich) ein oder mehrere Steuerungswerte

ermittelt und diese zumindest teilweise in wenigstens einem zeitlich nachfolgenden Erosionsabschnitt zur Steuerung des Funkenerosionsprozesses verwendet. Anspruch 15 sieht eine hierfür geeignete Vorrichtung vor, welche mit Antriebs- und Antriebssteuerungsmitteln für die Relativbewegung zwischen wenigstens einem Werkstück und einer Elektrode, Generatormitteln für die Erzeugung von Erosionsfunken, Mitteln zur Messung von Werten von Prozeßparametern, Mitteln zur Umwandlung solcher Meßwerte in Steuerungswerte und Speichermitteln ausgestattet ist. Dabei erfassen die Mittel zur Messung von Werten von Prozeßparametern wenigstens in einem Abschnitt einer zu erodierenden Strecke Werte für wenigstens einen Prozeßparameter. Die Mittel zur Umwandlung solcher Meßwerte in Steuerungswerte ermitteln aus Meßwerten wenigstens eines Prozeßparameters einen oder mehrere Steuerungswerte. Die Speichermittel speichern die so erhaltenen Steuerungswerte und die Antriebssteuerungsmittel verwenden sie schließlich zumindest teilweise in wenigstens einem zeitlich nachfolgenden Erosionsabschnitt zur Steuerung.

Ein solches Verfahren bzw. eine solche Vorrichtung ermöglicht es einer Erosionsmaschine, auf einfache Weise und ohne Beanspruchung eines Operators Steuerungsvorgaben für einen störungsfreieren Erosionsbetrieb selbstständig zu ermitteln. Dies kann sowohl auf einer eigens hierfür vorgesehenen Teststrecke, als auch auf einem Abschnitt einer zu erodierenden Strecke geschehen. Prinzipiell können so die Charakteristika einer beliebigen Werkstück-Elektroden-Paarung bei unterschiedlichen Betriebsparametern automatisch ermittelt werden. Die so erhaltenen Daten können sowohl nur für das "Meßwerkstück" als auch für beliebig viele gleichartige Werkstücke verwendet werden. Insbesondere wird dabei die Möglichkeit geschaffen, Störungen durch geeignete Steuerungswerte weitgehend im Vorfeld zu verhindern.

In einer bevorzugten Ausführungsform (Anspruch 2) beinhaltet wenigstens einer der ermittelten Steuerungswerte eine für eine gewünschte Werkstückbearbeitung geeignete Vorschubgeschwindigkeit der Elektrode(n). Vorzugsweise ist diese Vorschubgeschwindigkeit kleiner als die mittlere Vorschubgeschwindigkeit im Meßabschnitt (Anspruch 3 und 4) und wird durch Multiplikation der mittleren Vorschubgeschwindigkeit im Meßabschnitt mit einem Koeffizienten, welcher kleiner als eins (Anspruch 5) und vorzugsweise eine Funktion des Verhältnisses Elektrodendurchmesser/Werkstückdicke ist (Anspruch 6), ermittelt. In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung (Anspruch 7) der Erfindung wird die Elektrode in wenigstens einem auf den Meßabschnitt folgenden Abschnitt, insbesondere dem Schlußabschnitt, mit der ermittelten Vorschubgeschwindigkeit wenigstens solange konstant bewegt, wie kein Kurzschluß auftritt.

Vorteile dieser bevorzugten Ausführungsformen ergeben sich aus dem folgenden Sachverhalt: insbesondere wenn die Elektrode mit einer zu hohen Geschwindigkeit bewegt wird, verursacht sie "mechanische"

Kurzschlüsse durch direkte Kontakte mit dem Werkstück. Im Meßabschnitt wird die Elektrode daher -wie es dem Stand der Technik entspricht- regelmäßig nach Kurzschlüssen wieder zurückgezogen werden müssen.

Wenn aber gleichzeitig eine geeignete Vorschubgeschwindigkeit ermittelt wird, können in allen dem Meßabschnitt folgenden Abschnitten solche "mechanischen" Kurzschlüsse durch die "sichere" Geschwindigkeit weitgehend vermieden werden. Dies ergibt einen erheblich ungestörteren und somit präziseren Erosionsprozeß. Die einzelnen vorgestellten Ausführungsformen führen zu verschiedenen Abstufungen dieses positiven Effekts. Insbesondere die Gegenstände der Ansprüche 5 und 6 ermöglichen dabei außerdem eine besonders einfache und zugleich besonders sachgerechte Handhabung der Erfindung durch den Operateur.

Anspruch 8 sieht ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1-7 vor, bei welchem zwischen mechanischen und sonstigen Kurzschlüssen unterschieden und die Elektrodenbewegung bei mechanischen Kurzschlüssen anders als bei sonstigen Kurzschlüssen gesteuert wird. Anspruch 16 sieht eine hierfür geeignete Vorrichtung nach Anspruch 15 vor, welche mit Mitteln zur Messung von Werten von Prozeßparametern und Mitteln zur Umwandlung solcher Meßwerte in Steuerungswerte bzw. -signale ausgestattet ist. Dabei messen die Mittel zur Messung von Werten von Prozeßparametern beim Auftreten von Kurzschlüssen diesbezüglich signifikante Werte. Die Mittel zur Umwandlung von Meßwerten in Steuerungswerte unterscheiden aufgrund dieser Meßwerte zwischen mechanischen und sonstigen Kurzschlüssen und geben bei mechanischen Kurzschlüssen andere Steuerungswerte bzw. -signale als bei sonstigen Kurzschlüssen aus.

Nicht-mechanische Kurzschlüsse können beispielsweise durch bereits wegerodierte Teilchen in der Spülflüssigkeit verursacht werden. Da diese Teilchen rasch weggespült werden, ist es sinnvoll, solche Kurzschlußsituationen anders zu behandeln, als mechanische Kurzschlüsse. Insbesondere wird durch die differenzierte Behandlung von Kurzschlüssen die Möglichkeit geschaffen, einen wesentlich ungestörteren Erosionsbetrieb aufrecht zu erhalten. Gerade durch die Kombination einer "sicheren" Vorschubgeschwindigkeit mit dieser differenzierten Kurzschlußbehandlung können Störungen beim Erosionsbetrieb besonders wirkungsvoll reduziert werden (Kombination der Ansprüche 1 und 8 bzw. 15 und 16).

Die Unterscheidung zwischen mechanischen und sonstigen Kurzschlüssen wird vorzugsweise anhand der Kurzschlußspannung und/oder der Kurzschlußdauer getroffen (Anspruch 9), wobei die Kurzschlußdauer-Schwelle vorzugsweise eine Funktion des Verhältnisses Elektrodendurchmesser/Werkstückdicke sein sollte (Anspruch 10). (Mechanische Kurzschlüsse haben eine vergleichsweise längere Dauer und eine kleinere Spannung.) Während eines mechanischen Kurzschlusses wird die Elektrode vorzugsweise mit konstanter Geschwindigkeit rückwärts und sonst, insbesondere

auch während eines sonstigen Kurzschlusses, mit der Vorschubgeschwindigkeit V_a vorwärts bewegt (Anspruch 11). (Sobald ein mechanischer Kurzschluß vorüber ist, wird die Elektrode somit wieder mit V_a vorwärts bewegt.) Dabei ist die Rückzugsgeschwindigkeit vorzugsweise größer als die Vorschubgeschwindigkeit (Anspruch 12).

Derartige Ausgestaltungen der Erfindung ermöglichen auf besonders einfache Weise einen differenzierten Umgang mit Kurzschlüssen. So sind flexible Reaktionen leicht möglich, wodurch reaktionsbedingte zusätzliche Störungen minimiert werden können. Insbesondere die oben erwähnten Kurzschlüsse am Lochausgang bei Mikrobohrungen, welche -wie oben dargelegt- nicht-mechanischer Natur sind, führen nicht mehr zu einer Instabilitätsphase sowie damit zwingend verbundenen Präzisionsminderungen.

In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung wird die zu erodierende Strecke in genau zwei Abschnitte unterteilt, von denen einer (auch) zur Ermittlung von einem oder mehreren Steuerungswerten, insbesondere der Vorschubgeschwindigkeit für den Funkenerosionsprozeß im anderen Abschnitt genutzt wird, wobei das Verhältnis zwischen dem ersten und dem zweiten Abschnitt eine Funktion des Verhältnisses Elektrodendurchmesser/Werkstückdicke ist (Anspruch 13).

Auf diese Weise wird eine besonders einfache Handhabung der Erosionsmaschine gewährleistet: der Operateur muß beispielsweise bei Mikrodurchbohrungen von Werkstücken lediglich den Elektrodendurchmesser und die Werkstückdicke eingeben, um den gesamten Erosionsablauf festzulegen.

In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist die Elektrode für eine Mikrobohrung ausgelegt und der Bohrungsdurchmesser wird über eine Vorschubgeschwindigkeit V_b gesteuert, welche nicht größer als V_a sein darf und gemäß der Formel $V_b = k_d \cdot N_i \cdot k_k \cdot 4 / (\pi \cdot D \cdot D)$ für den jeweils gewünschten Lochdurchmesser bestimmt wird, wobei

N_i	= Anzahl der Entladungen pro Zeiteinheit
D	= gewünschter Lochdurchmesser ($= 2 \cdot \sqrt{A/\pi}$)
A	= entsprechende Fläche ($k_d \cdot N_i \cdot k_k / V_b$)
k_d	= Abtragskoeffizient = abgetragenes Volumen pro Entladung
k_k	= Wirkkoeffizient = Verhältnis der Anzahl der Kurzschlüsse zur Anzahl der Entladungen
π	= 3,1415...
$\sqrt{}$	= Quadratwurzel
V_b	= Vorschubgeschwindigkeit

bedeuten (Anspruch 14). Dabei wird k_d experimentell für jede bestimmte Bearbeitungsaufgabe ermittelt. N_i und k_k können im Rahmen des Meßabschnitts festgestellt werden, wenn neben der mittleren Vorschubgeschwindigkeit auch die Anzahl der Entladungen pro Zeiteinheit und die Anzahl der Kurzschlüsse im Verhältnis zur

Anzahl der Impulse pro Zeiteinheit gemessen und gemittelt werden.

Auf diese Weise ist es möglich, mit einer begrenzten Anzahl von Elektrodendurchmessern beliebige Mikrobohrungen präzise vorzunehmen. Der Durchmesser einer funkenerosiven Mikrobohrung ist nämlich eine Funktion der zum Funkenspalt gelieferten Energie für den Materialabtrag. Bei konstanter Leistung ist dies eine Funktion der Elektrodenverweildauer an der jeweiligen Bohrstelle, und somit eine Funktion der Vorschubgeschwindigkeit V_b . Gleichzeitig ist ein erfindungsgemäß weitgehend störungsfreier Erosionsbetrieb gewährleistet.

Nachstehend wird die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen und der beigefügten Zeichnung noch näher erläutert. In der Zeichnung zeigen:

- | | |
|-------|--|
| Fig.1 | ein Blockschaltbild eines Beispiels für eine erfindungsgemäße Erosionsmaschine; |
| Fig.2 | eine genauere Darstellung eines Teils einer erfindungsgemäßen Erosionsmaschine; |
| Fig.3 | ein Verlaufsdiagramm des Multiplikationskoeffizienten K_a als Funktion des Verhältnisses Elektrodendurchmesser/Werkstückdicke; |
| Fig.4 | ein Verlaufsdiagramm des Koeffizienten K_s als Funktion des Verhältnisses Elektrodendurchmesser/Werkstückdicke; |
| Fig.5 | ein Verlaufsdiagramm der Kurzschlußdauer-Schwelle D_{km} als Funktion des Verhältnisses Elektrodendurchmesser/Werkstückdicke; |
| Fig.6 | ein Zeitdiagramm der Elektrodenlage bei einer funkenerosiven Mikrobohrung mit bekannten Regelstrategien; |
| Fig.7 | ein Zeitdiagramm der Elektrodenlage bei einer funkenerosiven Mikrobohrung mit einer erfindungsgemäßen Erosionsmaschine; |
| Fig.8 | eine Darstellung der Streubreite des Ausgangsloch-Durchmessers bei einer Serienbearbeitung von 18 Mikrobohrungen mit bekannten Regelstrategien; und |
| Fig.9 | eine Darstellung der Streubreite des Ausgangsloch-Durchmessers bei einer Serienbearbeitung von 18 Mikrobohrungen mit einer erfindungsgemäßen Regelstrategie. |

Gemäß den Figuren bearbeitet eine Funkenerosionsmaschine ein Werkstück 7 nach dem erfindungsgemäßen Verfahren in wenigstens zwei Abschnitten. Dabei kommt es entscheidend darauf an, daß in wenigstens einem Abschnitt ein oder mehrere Steuerungswerte für den Funkenerosionsprozeß ermittelt und in wenigstens

einem weiteren genutzt werden. Es wäre ferner möglich, die ermittelten Steuerungswerte beispielsweise in einem weiteren Zwischenabschnitt zu überprüfen. Vorzugsweise aber wird die gesamte Erosionsstrecke in nur zwei Abschnitte unterteilt, welche im folgenden kurz als Meßabschnitt und Ausgangsabschnitt bezeichnet werden. Das Längenverhältnis dieser beiden Abschnitte wird durch den Koeffizienten K_s beschrieben. (Es gilt demnach: $M_s = (1 - K_s) \cdot S$ bzw. $A_s = K_s \cdot S$ mit M_s = Meßstrecke, A_s = Ausgangsstrecke und S = gesamte zu erodierende Strecke bzw. Werkstückdicke.)

Im Meßabschnitt arbeitet die Funkenerosionsmaschine im wesentlichen nach bekannten Verfahren bzw. mit Mitteln bekannter Vorrichtungen. Hierzu regelt -wie in Fig.1 beispielhaft dargestellt- ein bekanntes Servosystem 2 in Verbindung mit einem Antrieb 4 und einem Motor 4a die Lage einer Elektrode 6 gegenüber dem Werkstück 7. Ein Generator 8 liefert Erosionsimpulse. Eine Meßschaltung 3 analysiert die Spalt- bzw. Funkenstreckenspannung und liefert Steuersignale für das Servosystem 2. Ein Encoder 5 liefert Informationen über die Lage der Elektrode 6 an eine numerische Steuerung 9. Die numerische Steuerung 9 berechnet die Vorschubgeschwindigkeit, sowie, anhand von Eingaben des Operateurs, das Verhältnis Elektrodendurchmesser/Werkstückdicke, den Multiplikationskoeffizienten K_a , den Streckenverhältniskoeffizienten K_s , eine Kurzschlußdauer-Schwelle D_{km} und eine Komparatorschwelle K_{za} . Desweiteren werden während der Bearbeitung des Meßabschnitts die Anzahl der Entladungen pro Zeiteinheit und die Anzahl der Kurzschlüsse im Verhältnis zur Anzahl der Impulse pro Zeiteinheit gemessen und diese wie auch die Vorschubgeschwindigkeit gemittelt. Die gemittelte Vorschubgeschwindigkeit wird mit einem Koeffizienten K_a , welcher kleiner als eins ist, multipliziert. Die so erhaltene Geschwindigkeit wird als Ausgangsgeschwindigkeit V_a bezeichnet. Ferner bestimmt die numerische Steuerung 9 eine Rückwärtsgeschwindigkeit V_r , welche größer als V_a ist.

Die numerische Steuerung 9 gibt die im Meßabschnitt ermittelten Steuerwerte V_r , V_a , D_{km} , K_{za} an ein spezielles Servosystem 1 weiter. Wenn die Grenze zwischen Meß- und Ausgangsabschnitt erreicht wird, ersetzt die numerische Steuerung die Steuersignalverbindung zwischen dem bekannten Servosystem 2 und Antrieb 4 durch eine Verbindung zwischen dem speziellen Servosystem 1 und Antrieb 4, so daß nun die Steuerung der Elektrodenposition von der erfindungsgemäßen Vorrichtung 1 übernommen wird. Als eine Alternative kann das erfindungsgemäße Verfahren beispielsweise auch mittels eines oder mehrerer entsprechend programmierter Universalrechner anstelle der im folgenden erläuterten Vorrichtung durchgeführt werden. Ferner besteht die Möglichkeit, das Servosystem 1 und/oder das Servosystem 2 und/oder die numerische Steuerung 9 zusammenzufassen, beispielsweise in einem solchen Universalrechner. Dabei wird allerdings ein schneller Prozessor benötigt, da die Reaktionszeit der Schaltung sehr kurz sein muß.

Das spezielle Servosystem 1 ist in Fig.2 detailliert dargestellt. Die Vorwärts- (V_a) und Rückwärtsgeschwindigkeit (V_r) werden in Registern 11 bzw. 10 gespeichert. Ein Datenselektor 19 ist zuerst in Stellung ac, und bleibt in dieser Stellung, solange das RS-Flipflop 21 seinen Zustand nicht ändert, d.i. solange keine mechanischen Kurzschlüsse von Bedeutung festgestellt werden. Um dies zu entscheiden, wird die Pulsspannung in einem Register 14 gespeichert, ihre Amplitude mit der Schwelle K_{za} in einem Komparator 15 verglichen, und in einem Zähler 17 die Kurzschlußdauer entsprechend einem Taktgenerator 16 aufgezählt. Die so ermittelte Kurzschlußdauer wird mit der Kurzschlußdauer-Schwelle D_{km} durch einen vorzugsweise digitalen Komparator 18 verglichen. Wenn die Kurzschlußdauer größer als die durch die Kurzschlußdauer-Schwelle D_{km} vorgegebene ist, dann wird das RS-Flipflop 21 gesetzt, und der Datenselektor 19 liefert die Rückwärtsgeschwindigkeit V_r an einen Register 20. Dieser speichert V_r und gibt sie zum Antrieb 4 weiter. Die Elektrode 6 bewegt sich infolgedessen rückwärts. Sobald der Kurzschluß aufgehoben ist, schaltet das RS-Flipflop 21 um, und die Elektrode wird wieder mit V_a vorwärts bewegt.

Fig.3 zeigt ein Verlaufsdiagramm des Multiplikationskoeffizienten K_a als eine Funktion des Verhältnisses Elektrodendurchmesser/Werkstückdicke. Für tiefe Mikrobohrungen muß dieser kleiner als für weniger tiefe Bohrungen sein, weil hier die Spülverhältnisse schlechter sind. Der Multiplikationskoeffizient K_a stellt eine relative Obergrenze der Vorschubgeschwindigkeit V_a dar. Kleinere Geschwindigkeiten als V_a bieten, wie oben dargestellt, zusätzliche Möglichkeiten den Lochdurchmesser zu steuern.

Fig.4 zeigt ein Verlaufsdiagramm des Koeffizienten K_s als eine Funktion des Verhältnisses Elektrodendurchmesser/Werkstückdicke. Für tiefe Mikrobohrungen muß dieser aus denselben Gründen wie K_a kleiner sein als für weniger tiefe Bohrungen. Für ein Verhältnis Elektrodendurchmesser/Werkstückdicke $= V = 1/10$ hat beispielsweise $K_s = 0,1$ gute Resultate gegeben.

Fig.5 zeigt ein Verlaufsdiagramm der Kurzschlußdauer-Schwelle D_{km} als eine Funktion des Verhältnisses Elektrodendurchmesser/Werkstückdicke. Für tiefe Mikrobohrungen muß diese größer sein als für weniger tiefe Bohrungen, da die schlechteren Spülverhältnisse den Erosionsprozeß naturgemäß instabiler werden lassen. Für $V = 1/10$ hat beispielsweise $D_{km} = 0,6$ gute Resultate gegeben.

Fig.6 zeigt ein Zeitdiagramm der Elektrodenlage bei einer funkenerosiven Mikrobohrung mit bekannten Regelstrategien bzw. ohne eine erfindungsgemäße Vorrichtung. Die schraffierte Fläche stellt die Streuung des Prozesses beim Durchbruch dar, d.h. bei einer Serienbearbeitung liegen die Resultate in diesem Gebiet.

Fig.7 zeigt ein Zeitdiagramm der Elektrodenlage bei einer funkenerosiven Mikrobohrung mit einer erfindungsgemäßen Vorrichtung. Der Verlauf der Bearbeitung bei wiederholten Versuchen ist immer konstant und wiederholbar.

Fig. 8 zeigt eine Darstellung der Streubreite bzw. die Abweichung vom Sollwert des Ausgangsloch-Durchmessers bei einer Serienbearbeitung von 18 Mikrobohrungen mit bekannten Regelstrategien. Man erkennt eine beträchtliche Schwankung der Resultate von -6 Mikrometer bis +4 Mikrometer.

Fig. 9 zeigt eine Darstellung der Streubreite des Ausgangsloch-Durchmessers bei einer Serienbearbeitung von 18 Mikrobohrungen mit einer erfindungsgemäßen Vorrichtung. Man erkennt die markante Verbesserung der Resultate. Die verbleibenden Schwankungen sind von anderen prozeßbeeinflussenden Faktoren verursacht und liegen naturgemäß bei +/- 1 Mikrometer.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Steuerung wenigstens eines Funkenerosionsprozesses zwischen wenigstens einem Werkstück (7) und wenigstens einer Elektrode (6), insbesondere einer Mikrobohrungselektrode, bei welchem
 - a) wenigstens in einem Abschnitt einer zu erodierenden Strecke Meßwerte wenigstens eines Prozeßparameters erfaßt,
 - b) aus den Meßwerten wenigstens eines Prozeßparameters ein oder mehrere Steuerungswerte ermittelt und
 - c) diese zumindest teilweise in wenigstens einem zeitlich nachfolgenden Erosionsabschnitt zur Steuerung des Funkenerosionsprozesses verwendet werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei welchem wenigstens einer der ermittelten Steuerungswerte eine für eine gewünschte Werkstückbearbeitung geeignete Vorschubgeschwindigkeit (V_a) der Elektrode(n) (6) beinhaltet.
3. Verfahren nach Anspruch 2, bei welchem die Vorschubgeschwindigkeit (V_a) aus der mittleren Vorschubgeschwindigkeit der Elektrode (6) im Meßabschnitt ermittelt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 3, bei welchem die Vorschubgeschwindigkeit (V_a) kleiner ist als die mittlere Vorschubgeschwindigkeit im Meßabschnitt.
5. Verfahren nach Anspruch 4, bei welchem die Vorschubgeschwindigkeit (V_a) aus der mittleren Vorschubgeschwindigkeit im Meßabschnitt durch Multiplikation mit einem Koeffizienten (K_a), welcher kleiner als eins ist, ermittelt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 5, bei welchem der Multiplikationskoeffizient (K_a) eine Funktion des Verhältnisses Elektrodendurchmesser/Werkstückdicke ist.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem die Elektrode (6) wenigstens in einem dem Meßabschnitt zeitlich nachfolgenden Erosionsabschnitt, insbesondere dem Schlußabschnitt einer Erosionsstrecke, mit der ermittelten Vorschubgeschwindigkeit (V_a) wenigstens solange konstant bewegt wird, wie kein Kurzschluß auftritt.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem zwischen mechanischen und sonstigen Kurzschlüssen unterschieden und die Elektrodenbewegung bei mechanischen Kurzschlüssen anders als bei sonstigen Kurzschlüssen gesteuert wird.
9. Verfahren nach Anspruch 8, bei welchem die Unterscheidung zwischen mechanischen und sonstigen Kurzschlüssen anhand der Kurzschlußspannung und/oder der Kurzschlußdauer getroffen wird.
10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, bei welchem die Kurzschlußdauer mit einer Kurzschlußdauer-Schwelle (D_{km}) verglichen wird, wobei die Kurzschlußdauer-Schwelle (D_{km}) eine Funktion des Verhältnisses Elektrodendurchmesser/Werkstückdicke ist.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 10, bei welchem die Elektrode (6) während eines mechanischen Kurzschlusses mit konstanter Geschwindigkeit rückwärts und sonst, insbesondere auch während eines sonstigen Kurzschlusses, vorwärts bewegt wird.
12. Verfahren nach Anspruch 11, bei welchem die Rückzuggeschwindigkeit größer als die Vorschubgeschwindigkeit ist.
13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem wenigstens eine zu erodierende Strecke in genau zwei Abschnitte unterteilt wird, von denen der erste zur Ermittlung von einem oder mehreren Steuerungswerten, insbesondere der Vorschubgeschwindigkeit (V_a) für den Funkenerosionsprozeß im zweiten Abschnitt genutzt wird, wobei das Verhältnis (K_s) zwischen dem ersten und dem zweiten Abschnitt eine Funktion des Verhältnisses Elektrodendurchmesser/Werkstückdicke ist.
14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem die Elektrode (6) für eine Mikrobohrung ausgelegt ist und der Bohrungsdurchmesser über eine Vorschubgeschwindigkeit (V_b) gesteuert wird, welche nicht größer als die nach einem der Ansprüche 1 - 7 ermittelte Vorschubgeschwindigkeit (V_a) ist und gemäß der Formel $V_b = k_d \cdot n_i \cdot k_k^4 / (\pi \cdot D \cdot D)$ dem gewünschten

ten Bohrlochdurchmesser (D) entsprechend bestimmt wird, wobei

Ni = Anzahl der Entladungen pro Zeiteinheit
 D = gewünschter Bohrlochdurchmesser 5
 ($= 2 \cdot \sqrt{A/\pi}$)
 A = entsprechende Fläche ($= k_d \cdot N_i \cdot k_k / V_b$)
 k_d = Abtragskoeffizient = abgetragenes Volumen pro Entladung
 k_k = Wirkkoeffizient = Verhältnis der Anzahl der Kurzschlüsse zur Anzahl der Entladungen 10
 pi = 3,1415...
 sqrt = Quadratwurzel
 V_b = Vorschubgeschwindigkeit 15

bedeuten.

15. Vorrichtung zur Durchführung und Steuerung wenigstens eines Funkenerosionsprozesses zwischen wenigstens einem Werkstück (7) und wenigstens einer Elektrode (6), insbesondere einer Mikrobohrungselektrode, welche mit Antriebs- und Antriebssteuerungsmitteln (1, 2, 4, 4a, 9) für die Relativbewegung zwischen wenigstens einem Werkstück und einer Elektrode, Generatormitteln (8) für die Erzeugung von Erosionsfunken, Mitteln (3, 5) zur Messung von Werten von Prozeßparametern, Mitteln (9) zur Umwandlung solcher Meßwerte in Steuerungswerte und Speichermitteln (10 - 14) ausgestattet ist, bei welcher 20

a) die Mittel (3, 5) zur Messung von Werten von Prozeßparametern wenigstens in einem Abschnitt einer zu erodierenden Strecke Werte für wenigstens einen Prozeßparameter erfassen, 25 35

b) die Mittel (9) zur Umwandlung solcher Meßwerte in Steuerungswerte aus Meßwerten wenigstens eines Prozeßparameters ein oder mehrere Steuerungswerte ermitteln, 40

c) die Speichermittel (10 - 14) die so erhaltenen Steuerungswerte speichern, und 45

d) die Antriebssteuerungsmittel (1, 2, 9) diese zumindest teilweise in wenigstens einem zeitlich nachfolgenden Erosionsabschnitt zur Steuerung verwenden. 50

16. Vorrichtung nach Anspruch 15, welche mit Mitteln (3, 5) zur Messung von Werten von Prozeßparametern und Mitteln (9, 10 - 19, 21) zur Umwandlung solcher Meßwerte in Steuerungswerte bzw. -signale ausgestattet ist, bei welcher 55

a) die Mittel (3, 5) zur Messung von Werten von Prozeßparametern beim Auftreten von Kurz-

schlüssen diesbezüglich signifikante Werte messen,

b) die Mittel (9, 10 - 19, 21) zur Umwandlung von Meßwerten in Steuerungswerte aufgrund dieser Meßwerte zwischen mechanischen und sonstigen Kurzschlüssen unterscheiden und

c) bei mechanischen Kurzschlüssen andere Steuerungswerte bzw. -signale als bei sonstigen Kurzschlüssen ausgeben.

17. Vorrichtung nach Anspruch 15 und 16, bei welchem die Umwandlungsmittel (9, 10-19, 21) umfassen:

a) Speichermittel (10, 11), welche ermittelte Steuerungswerte, insbesondere eine für eine gewünschte Werkstückbearbeitung geeignete Vorschubgeschwindigkeit (V_a) und eine Rückwärtsgeschwindigkeit (V_r), speichern,

b) ein Datenselektormittel (19), welches von den Speichermitteln (9) und (10) eines ausgewählt,

c) ein Schaltmittel (21) zur Steuerung des Datenselektormittels (19) und

d) Kurzschlußbeurteilungsmittel (12 - 18), welche Kurzschlüsse als wesentlich bzw. mechanisch oder unwesentlich bzw. sonstige einstufen, so daß bei mechanischen Kurzschlüssen über das Schaltmittel (21) und das nachfolgende Datenselektormittel (19) die Elektrode (6) mit der Rückwärtsgeschwindigkeit (V_r) bis zur Beendigung des Kurzschlusses zurückgezogen wird.

vorgesehen sind.

18. Vorrichtung nach Anspruch 17, bei welchem die Kurzschlußbeurteilungsmittel (12 - 18) eine Pulsspannung in einem Register (14) speichern, deren Amplitude mit der Schwelle (K_{za}) in einem Komparator (15) vergleichen, in einem Zähler (17) die Kurzschlußdauer entsprechend einem Taktgenerator (16) aufzählen und die so ermittelte Kurzschlußdauer mit einer Kurzschlußdauer-Schwelle (D_{km}) durch einen Komparator (18) vergleichen und entsprechende Steuersignale an das Schaltmittel (21) weitergeben.

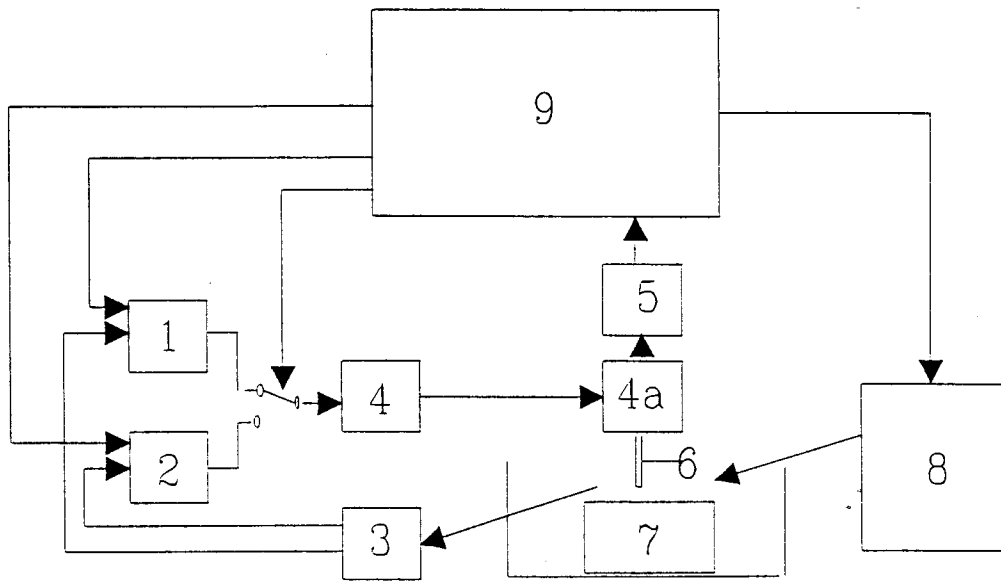


Fig. 1

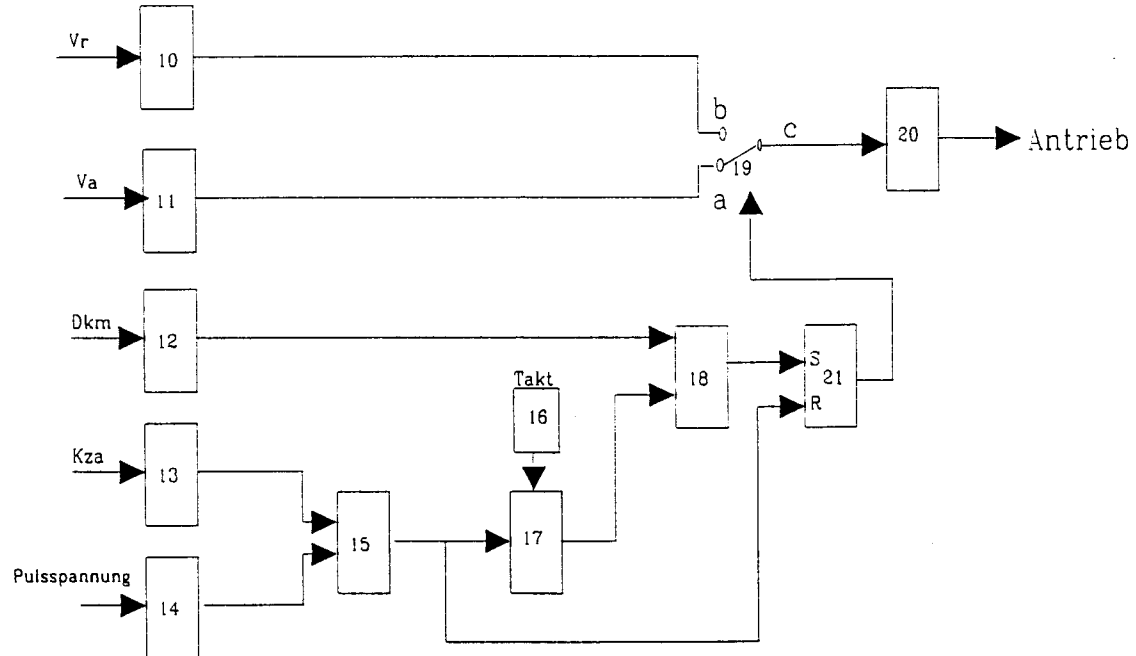
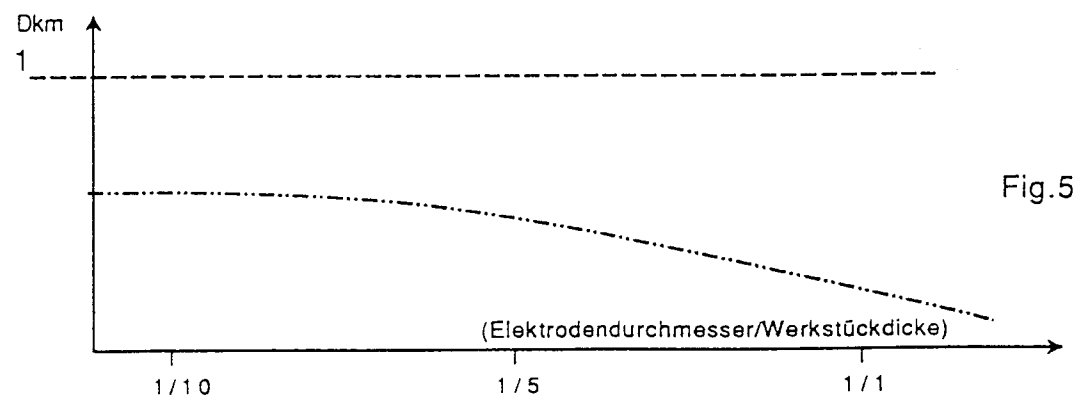
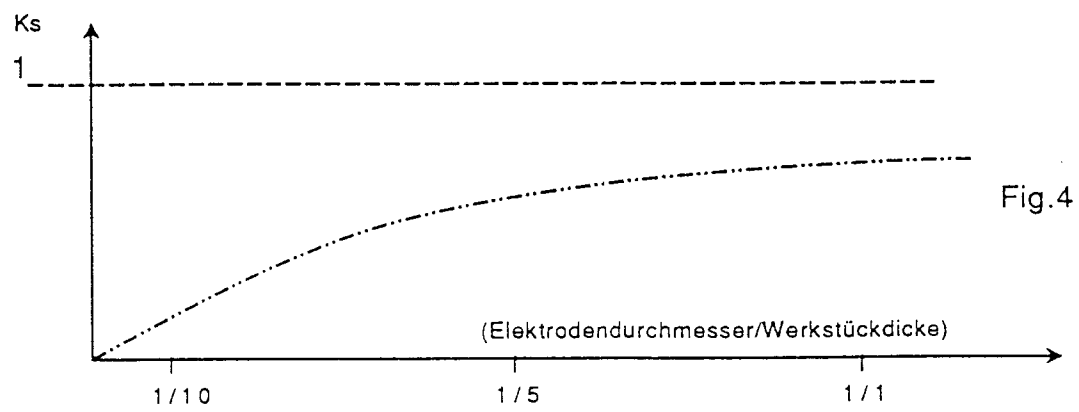
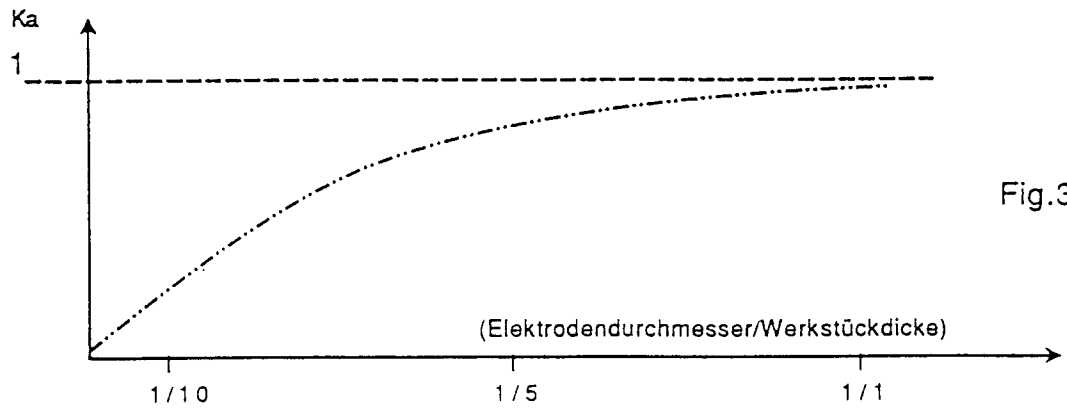


Fig. 2



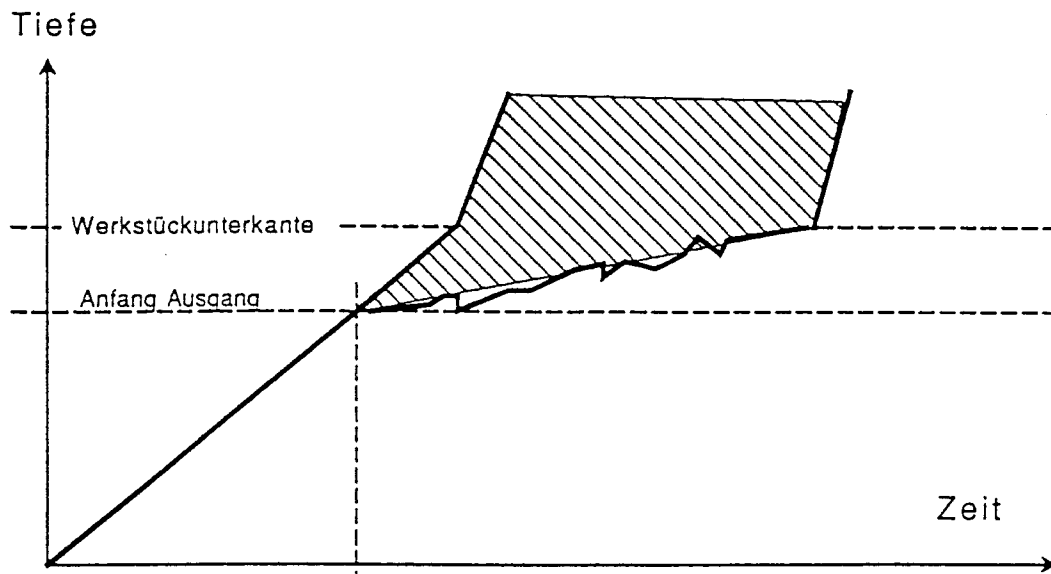


Fig.6

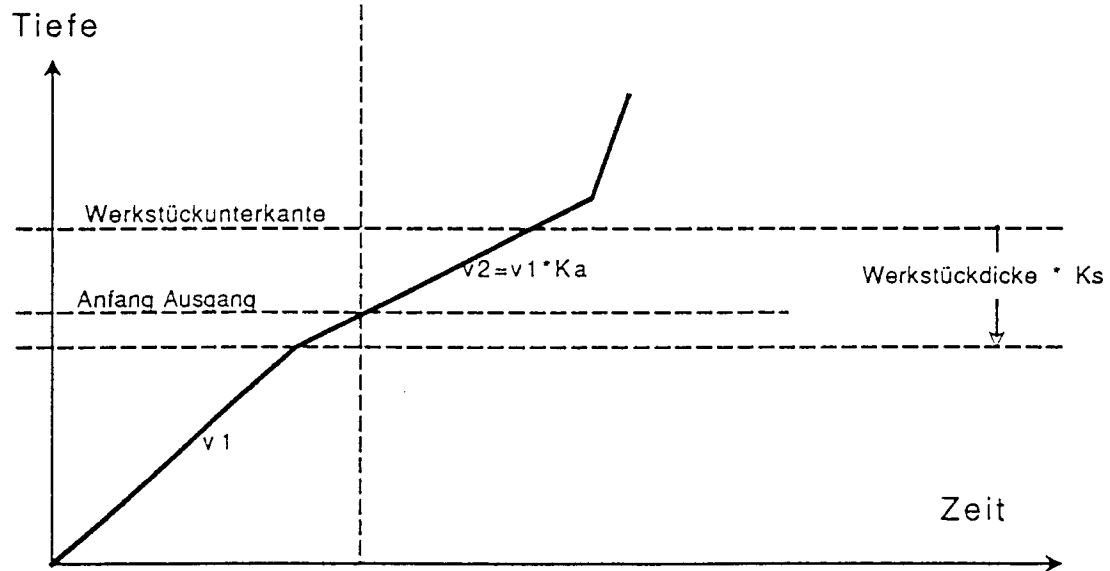


Fig.7

